



## 基于矢量面元的弱信号恢复技术在低信噪比资料处理中的应用

周 凡, 邓利峰, 徐洪斌

**Application of weak signal recovery technique based on vector bin to low signal-to-noise ratio data processing**

ZHOU Fan, DENG Lifeng, and XU Hongbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021033102>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 221

#### 东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151

#### 江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

#### 海洋环境中甲烷好氧化过程的研究进展

A review on microbial aerobic methane oxidation in marine environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 67



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021033102

# 基于矢量面元的弱信号恢复技术在低信噪比资料处理中的应用

周凡<sup>1</sup>, 邓利峰<sup>1</sup>, 徐洪斌<sup>2</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570000

2. 北京东方联创地球物理技术有限公司, 北京 100029

**摘要:** 受地表条件和地震波激发、传播以及接收条件等诸多因素的影响, 地震记录上往往会出现各种严重的干扰波, 这些噪声给弱有效反射波信息的利用带来了极为不利的影响。基于矢量面元的弱信号恢复技术可恢复还原被噪声淹没的弱信号, 压制噪声效果好。该技术将每一个 CMP 目标道都形成一个对应的矢量面元道集, 利用矢量面元道集内具有规则波同相轴成水平状或准水平状的重要特征, 采用希尔伯特变换将矢量面元道集转换为复数域矢量面元余弦相位函数道集, 通过直接获得水平同相轴, 以实现信噪分离。实际应用结果表明: 该技术可实现有效弱反射波的精确恢复, 可提高速度分析、叠加及偏移成像等分析处理的品质, 处理成果的信噪比和保幅性高。

**关键词:** 矢量面元; 弱信号恢复; 波场分离; 去噪处理; 低信噪比; 保幅性

中图分类号: P631

文献标识码: A

## Application of weak signal recovery technique based on vector bin to low signal-to-noise ratio data processing

ZHOU Fan<sup>1</sup>, DENG Lifeng<sup>1</sup>, XU Hongbin<sup>2</sup>

1. Hainan Branch Company of CNOOC (China) Ltd, Haikou 570000, China

2. Beijing Oriental Union Geophysical Co. Ltd, Beijing 100029, China

**Abstract:** Influenced by such factors as surface, source, transmission and receiver conditions, there are always serious interference wavefields in seismic data, which bring extremely adverse effects on the utilization of effective weak reflection signals. The weak signal recovery technology based on vector bin can restore the weak signals submerged by noise, and obtain good noise suppression effect. The technology splits each CMP gather to form a corresponding vector bin set, using the important features that reflected events are horizontal or quasi horizontal in vector bin gather, Hilbert transform is used to transform vector bin gather into complex domain vector bin cosine phase function gathers, and the horizontal events are obtained directly to achieve signal-to-noise separation. The practical application results show that this technique can achieve accurate recovery of effective weak reflection, improve the velocity analysis quality, stacking and migrating imaging effect, and achieve high signal-to-noise ratio data and amplitude preservation.

**Key words:** vector bin; weak signal recovery; wavefield separation; denoising processing; low signal-to-noise ratio; amplitude preservation

随着油气勘探开发的不断深入, 对储层识别和预测精度要求越来越高, 给资料的保幅压噪处理提出了更高的要求。国内外专家学者在地震资料保幅噪声压制方面开展了大量研究, 研发出多种针对性的处理技术<sup>[1-2]</sup>, 如针对低频面波的衰减技术有: 自适应衰减低频噪声、非线性局部滤波器干涉预测和相减压制表面波<sup>[3]</sup>等; 针对规则相干噪声的衰减技术有: 时间-空间域自适应噪声衰减法<sup>[4]</sup>、F-X 域

噪声衰减法<sup>[5]</sup>、外部噪声模型噪声衰减法、 $\tau$ - $p$  域切除法、FX 域预测误差噪声衰减法<sup>[6]</sup>、高精度径向道扫描噪声衰减法、频率-波数(F-K)视速度噪声衰减法等; 针对异常不规则噪声和高频干扰的衰减技术有: 强能量干扰的分频分时自适应检测与压制、小波时空变阈值去噪<sup>[7]</sup>、高频噪声的自动检测与衰减等; 针对随机干扰的衰减技术有: 高阶 seisset 变换衰减随机噪声<sup>[8]</sup>、基于贝叶斯阈值估计的曲波域自适

资助项目: 中海石油(中国)有限公司重大项目“南海西部油田上产 2000 万方关键技术研究”(CNOOC-KJ135ZDXM38ZJ02ZJ)

作者简介: 周凡(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋油气勘探研究, E-mail: Zhoufan3@cnooc.com.cn

通讯作者: 徐洪斌(1971—), 男, 主要从事油气勘探研究, E-mail: east\_union@163.com

收稿日期: 2021-03-31; 改回日期: 2021-05-18. 蔡秋蓉编辑

应阈值衰减随机噪声<sup>[9]</sup>、叠前随机噪声衰减(RNA)、基于 F-XYO 预测理论衰减随机噪声<sup>[10]</sup>、基于曲波变换的自适应地震随机噪声消除<sup>[11]</sup>、高维地震数据 Wiener 中心滤波<sup>[12]</sup>等;针对散射干扰的衰减技术有:随机函数数据重构的方法<sup>[13]</sup>等。另外,保幅压噪技术的思想核心是信噪分离<sup>[14]</sup>,信噪分离技术主要有:中值相关滤波信噪分离方法<sup>[15]</sup>、中值约束下的矢量分解信噪分离方法<sup>[16]</sup>、LIFT(linear interference filter technique)信噪分离方法<sup>[17]</sup>、基于波原子域的叠前地震资料信噪分离方法<sup>[18]</sup>、矢量分解信噪分离方法<sup>[19]</sup>、倾角中值滤波信噪分离方法<sup>[20]</sup>、奇异值分解信噪分离方法<sup>[21]</sup>等。上述这些方法技术均有其特点和优势,通过结合噪声分布和频率特点,选择合适的处理域、分频处理及波场分离技术,可取得很好的压制噪声效果,获得高品质的成果数据<sup>[22]</sup>,在油气勘探开发的资料处理中发挥了重要作用。

但在复杂地震勘探区块有地形高差变化剧烈、激发接收条件较差等不利因素,采集到的地震资料信噪比极低或较低,尤其是当地震记录的目的层附近的有效信号较弱时,常规的噪音压制技术还存在一定的局限性和不适应性,如在去除噪音同时损失了部分有效弱信号及振幅保真度不够高等方面的问题,地震资料处理成像品质受限于资料信噪比过低的问题日益突出,迫切需要在弱信号恢复方面下功夫,在保幅前提下深入开展弱信号恢复技术的研究,充分利用弱有效信号来改善资料的处理品质。因此,我们开发出了基于矢量面元的弱信号恢复技术,该技术在保振幅、保频率、保相位的基础上,实现压制噪声,提高目标道的信噪比。在精确恢复有效弱反射波的同时,很好地保持了有效信号的能量,可满足保真去噪技术要求。在改善叠前道集、叠加剖面 and 成像剖面品质上均有明显效果,基本解决常规叠前去噪技术难以解决的弱信号保幅去噪技术

瓶颈问题。

## 1 矢量面元的弱信号恢复技术

### 1.1 基本原理

矢量面元的概念:在叠前道集内指定某一个地震道为目标道,该目标道所处 CMP 面元为中心 CMP 面元,并以目标道的偏移距和方位角为标准,从中心 CMP 面元及相邻 CMP 面元中筛选出偏移距和方位角与标准相一致的地震道构建的新面元,图 1 给出了矢量面元构建示意图。

每一个目标道都形成一个对应的矢量面元道集,矢量面元道集内具有规则波同相轴成水平状或准水平状的重要特征,直接获得水平同相轴将成就叠前去噪技术的诸多算法,是该技术的核心所在。基于矢量面元道集的上述特征,利用复数域处理方法,恢复还原被噪声淹没的弱信号。

具体做法是:在输入叠前道集中,指定一个待处理的目标道  $X_m(t)$  (图 2)。

设目标道  $X_m(t)$  所在 CMP 面元为中心 CMP 面元,以该目标道的偏移距和方位角为标准,从中心 CMP 面元及相邻 CMP 面元中筛选出偏移距和方位角与标准相一致的地震道构建成矢量面元道集(图 2)。

设:矢量面元道集为  $X_i(t)$ , 其中  $i$  为道序列号,  $t$  为时间序列。显然,  $X_i(t)$  中包含目标道  $X_m(t)$ 。

利用公式(1)进行矢量面元道集水平叠加

$$k(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) \quad (1)$$

式中:  $k(t)$  为水平叠加道,  $n$  为道数或覆盖次数。以  $k(t)$  作为对目标道处理的最终输出结果是该技术的选项之一。

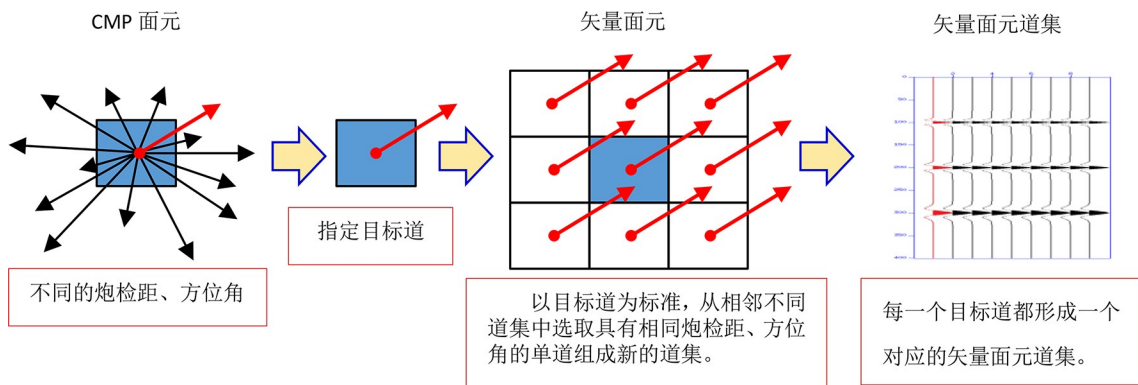


图 1 矢量面元构建示意图

Fig.1 Schematic diagram of vector plane element construction

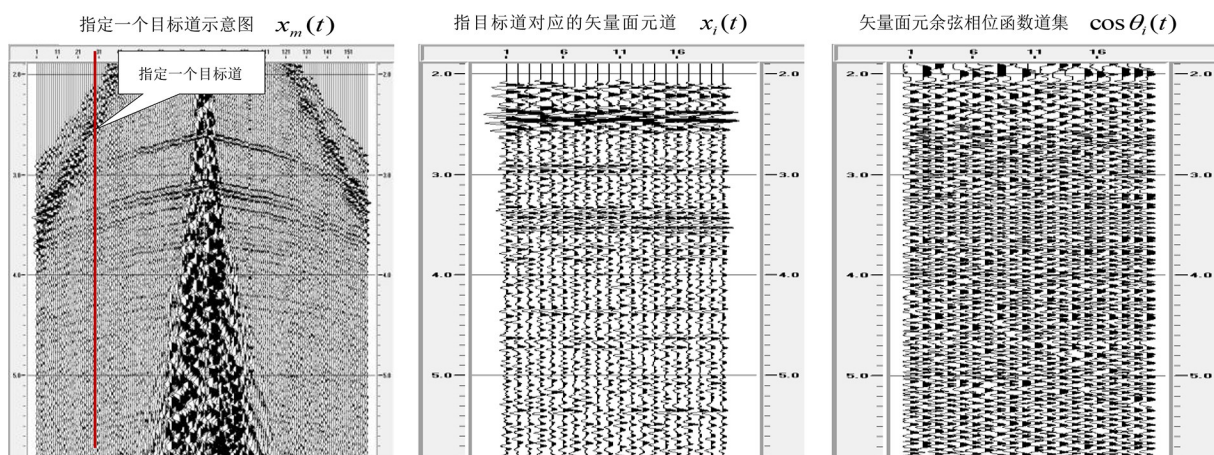


图 2 目标道对应的矢量面元道集及矢量面元余弦相位函数道集示意图

Fig.2 Schematic diagram of vector element trace set and cosine phase function trace set of vector element corresponding to target trace

利用希尔伯特变换将矢量面元道集  $X_i(t)$  转换为复数域矢量面元余弦相位函数道集  $\cos\theta_i(t)$ , 获得复数域矢量面元道集。

设希尔伯特变换为  $h_i(t)$ , 则希尔伯特变换表达式为:

$$h_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x_i(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

瞬时包络表达式为:

$$a_i(t) = \sqrt{x_i^2(t) + h_i^2(t)} \quad (3)$$

瞬时相位表达式为:

$$\theta_i(t) = \arccos \left( \frac{x_i(t)}{a_i(t)} \right) \quad (4)$$

余弦相位函数为:

$$\cos\theta_i(t) = \frac{x_i(t)}{a_i(t)} \quad (5)$$

如图 3 所示, 余弦相位函数  $\cos\theta_i(t)$  与振幅无关, 其弱信号的振幅与强信号的振幅是平等的, 无强弱信号之分。换言之, 在  $\cos\theta_i(t)$  中, 弱信号得到了有效加强(图 2)。

利用复数域余弦相位函数道集  $\cos\theta_i(t)$  获得复数域加权函数  $g(t)$ :

$$g(t) = \frac{1}{n} \cdot \frac{\left[ \sum_{i=1}^n \cos\theta_i(t) \right]^2}{\sum_{i=1}^n [\cos\theta_i(t)]^2} \quad (6)$$

利用公式(7)进行加权水平叠加

$$y_m(t) = g(t) \cdot k(t) \quad (7)$$

式中:  $y_m(t)$  为指定目标道的最终处理结果。完成一个目标道的处理结果后, 再指定下一个目标道, 重

复上述做法, 直至完成整个或局部工区叠前资料的弱信号恢复处理。

## 1.2 技术路线

归纳总结上述基本原理, 矢量面元的弱信号恢复技术的技术路线如图 4 所示。

## 1.3 子波恢复及保真去噪指标

子波恢复及保真去噪处理有其技术指标, 如图 5 所示, 设恢复前的原信号子波为  $S(t)$ , 恢复后的信号子波为  $\hat{S}(t)$ , 则恢复前后的残差为  $\delta(t) = S(t) - \hat{S}(t)$ 。当  $\delta(t) \neq 0$  时, 多数是出现了振幅恢复、频率恢复、相位恢复这 3 类误差(图 5 右侧); 当  $\delta(t) = 0$  时, 则认为达到了子波恢复的理论指标。而面对低信噪比叠前实际地震资料的保真去噪处理, 子波恢复及保真去噪处理的实际指标通常是用去噪处理前后的残差道集及其叠加剖面中无明显的残留子波同相轴来衡量。

## 2 应用效果分析

### 2.1 矢量面元处理

相邻 CMP 面元个数即矢量面元大小由处理参数控制。矢量面元构建过程中, 允许偏移距和方位角与标准存在一定的误差, 其偏移距误差和方位角误差受处理参数控制, 误差参数越大, 矢量面元获得的道数则越多, 覆盖次数的增加有利于提高信噪比, 但不利于提高保真度。本次应用处理矢量面元参数为  $3 \times 3$ , 即以目标道所处的 CMP 面元为中心前后左右各扩出 1 排面元, 在 Inline 方向和 Crossline

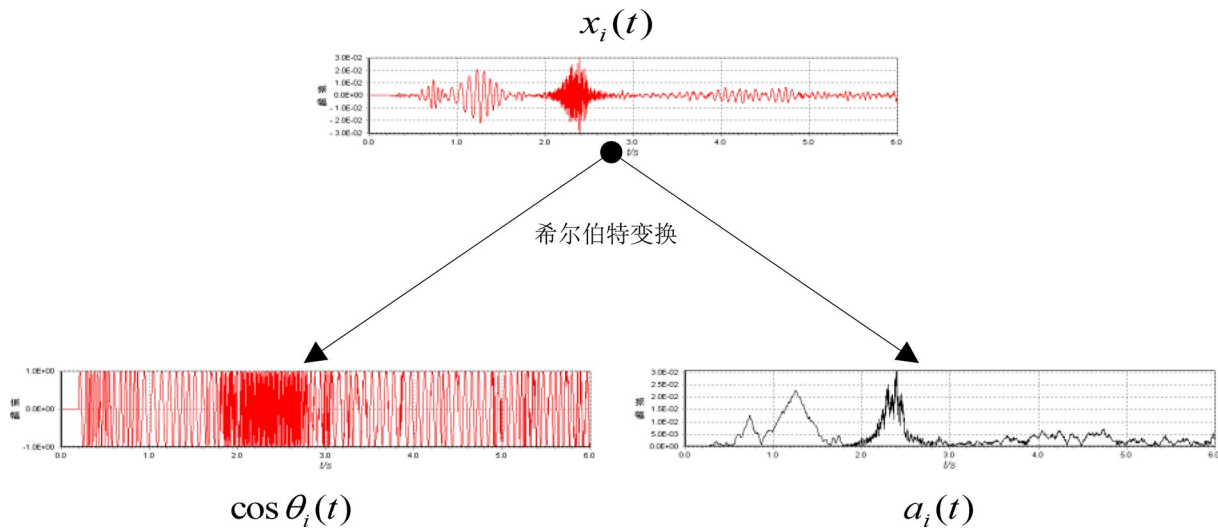


图 3 希尔伯特变换分解原理图

Fig.3 Hilbert transform decomposition schematic diagram

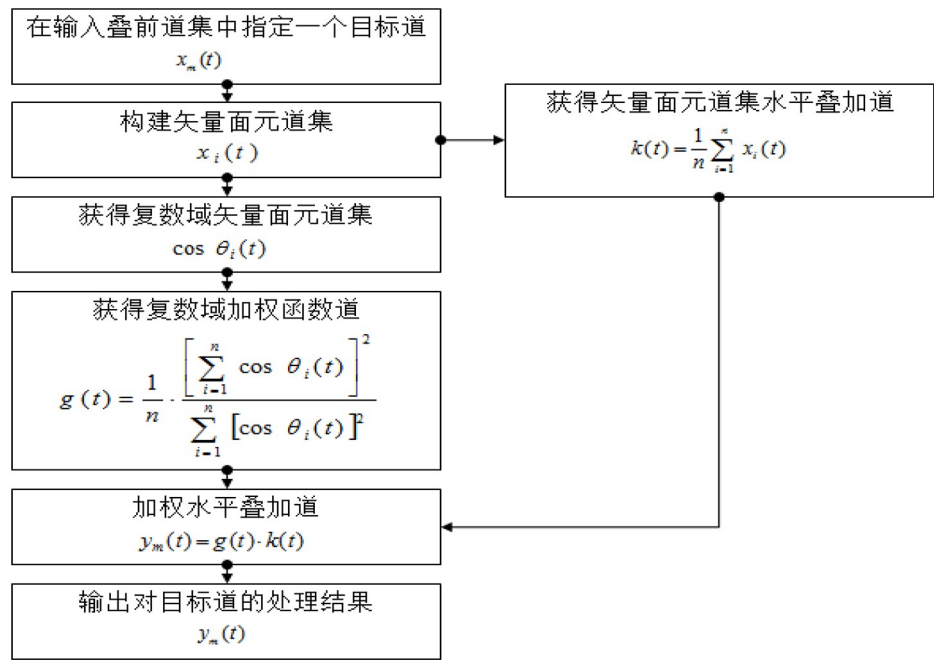


图 4 矢量面元的弱信号恢复技术的路线图

Fig.4 Technical-road chart of weak signal recovery technology for vector facets

方向均为 3 个 CMP 面元, 共计 9 个 CMP 面元(图 1 中的矢量面元); 偏移距误差为 25 m, 即以目标道的偏移距为标准, 在-25 m 到+25 m 的误差内, 认为偏移距是一致的; 方位角误差为 30°, 即以目标道的方位角为标准, 在-30°到+30°的误差内, 认为方位角是一致的。

2.2 炮集记录

基于矢量面元的弱信号恢复技术的输入和输出均为 CMP 道集文件, 为了便于考察本技术的信

噪分离效果, 可将弱信号恢复前后的 CMP 道集均分选回到常用的炮集记录。图 6 为应用本技术处理前后及残差炮集记录对比。原始炮记录存在强的面波、线性干扰和随机干扰, 采用普通方法很难压制干净, 尤其是被强面波掩盖的弱有效波难以得到有效的恢复, 但经基于矢量面元的弱信号恢复技术处理, 各种干扰波均得到了较好的分离, 被强面波掩盖的近道弱有效信号得到了有效恢复, 为后期进一步去除强面波处理奠定了良好的基础, 可避免常规去面波处理给弱信号带来的损伤。

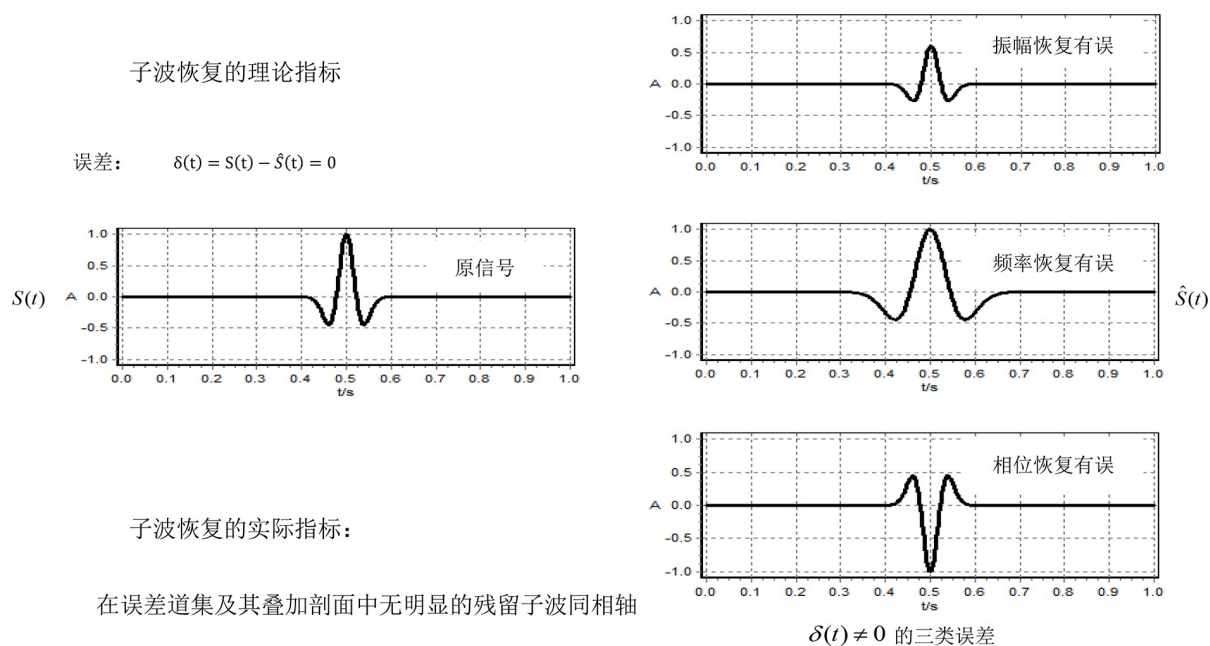


图 5 子波恢复及保真去噪指标示意图

Fig.5 Schematic diagram of wavelet recovery and fidelity denoising indexes

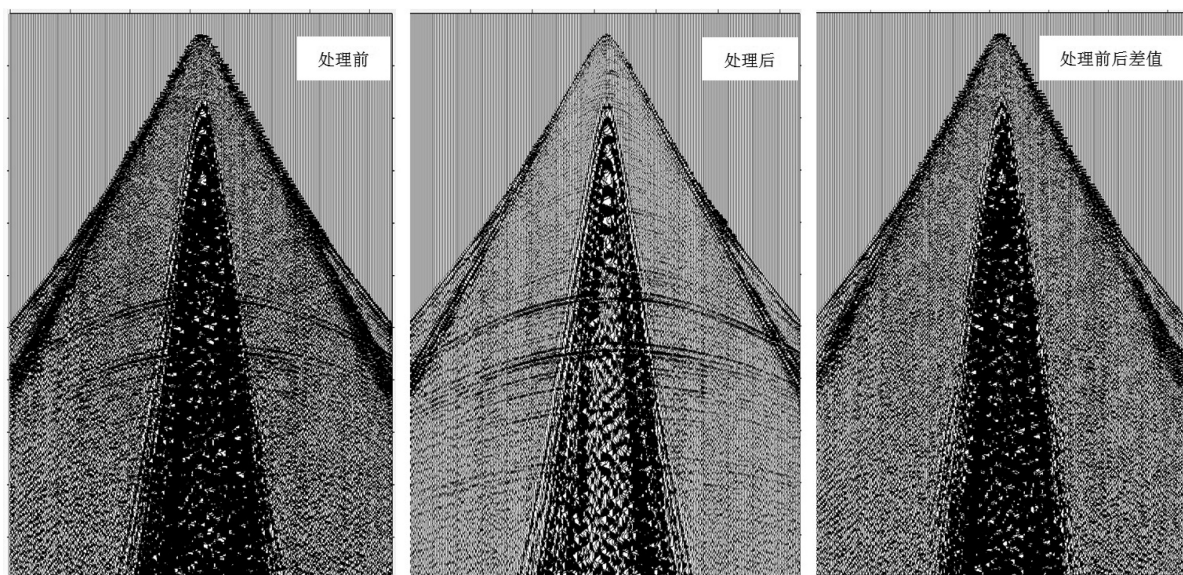


图 6 某工区应用本技术处理前、后及其残差的炮集记录对比

Fig.6 Comparison of shot records before and after and their residuals treatment with this technique in a working area

### 2.3 速度谱

图 7 为应用本技术处理前、后的 CMP 道集及其残差道集和对应的速度谱。由于工区的激发接收条件差,采集到的地震资料信噪比较低,肉眼难以观测到叠前道集中的有效波同相轴,资料的有效信号几乎完全淹没在噪音中。经该技术处理后,弱有效信号恢复后的信噪比得到显著提高,速度谱有效波能量团清晰可见。处理前后的残差道集及其速度谱,残差道集内无明显的有效波同相轴,速度

谱中亦无任何有效波能量团,说明弱有效信号得到了较好的保护。

### 2.4 频谱

图 8 为与图 7 对应的弱信号恢复前后 CMP 道集及残差 CMP 道集的频谱。由于应用本技术处理前的 CMP 道集及应用本技术处理前后的残差 CMP 道集均以噪声为主体,所获频谱几乎一致的原因是:它们只能反映出记录中占主要能量的噪声的频谱,无法获得有效波的频率分布情况。应用本技术

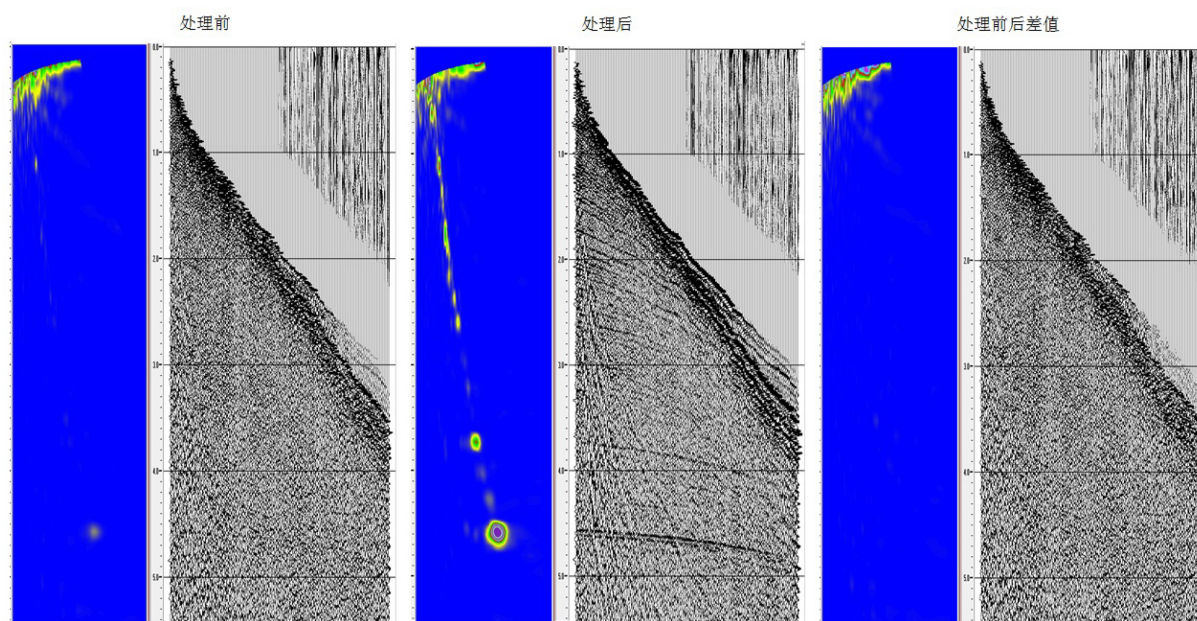


图 7 某工区应用本技术处理前、后的 CMP 道集及其残差道集和对应的速度谱

Fig.7 The technique is applied in a working area to deal with the pre - and post-CMP trace sets, their residual trace sets and the corresponding velocity spectrum

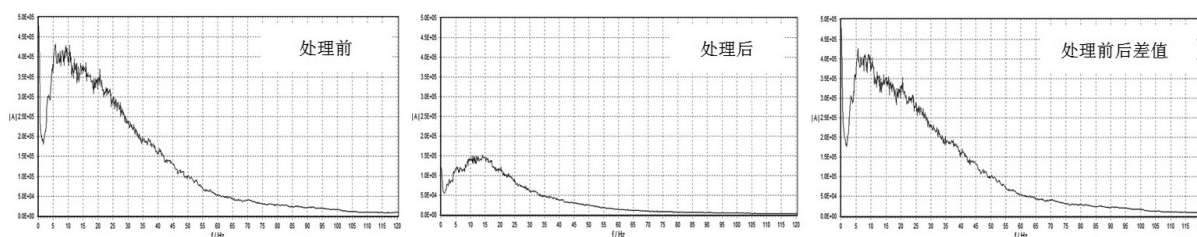


图 8 弱信号恢复前后 CMP 道集及残差 CMP 道集的频谱

Fig.8 Spectrum of CMP sets and residual CMP sets before and after weak signal recovery

处理后的 CMP 道集的弱有效信号得到恢复,其频谱变得真实有效,可见有效波的主频约 15 Hz。表明低信噪比资料中的弱有效信号在应用该技术后,可得到较好的恢复,这即是本技术力图解决的技术难题之一。

## 2.5 叠加

图 9 为某工区应用本技术处理前、后及残差数据的叠加剖面,可见,弱信号恢复处理后目的层弱反射部分较恢复前的品质得到明显提高;从恢复前后的残差道集水平叠加剖面中未发现有效波同相轴,可见,该技术应用不会损失有效波成分。

图 10 为某工区应用本技术处理前后的局部放大叠加剖面,对比结果表明,该技术处理后有剖面品质有明显提高,尤其是针对层间信噪比较低的弱反射部位的品质改善更为明显,为后续高分辨处理奠定了良好的基础,并表现出极高的保真度,可利好叠前偏移成像处理。

## 3 结论

(1)去噪处理是低信噪比地震数据处理中的关键之一,低信噪比资料处理品质与有效波弱信号恢复的质量密切相关。基于矢量面元的弱信号恢复技术可实现有效弱反射波的精确恢复,可有效压制低信噪比地震数据中的噪声,满足保真去噪的技术要求,处理成果保幅性高,可为后续开展岩性解释研究提供可靠的基础资料。

(2)该技术仅适用于三维采集测网及观测系统比较规则的工区资料,此类工区各目标道对应的矢量面元道集的覆盖次数相对稳定;必须已知方位角,方位角的缺失将严重影响该技术的处理效果;必须提供准确的炮点和检波点坐标值。然而,面向复杂探区非规则的工区资料,各目标道对应的矢量面元道集的覆盖次数是不稳定的,可能出现极低覆盖次数现象,针对这类情况的处理方法还需做进一

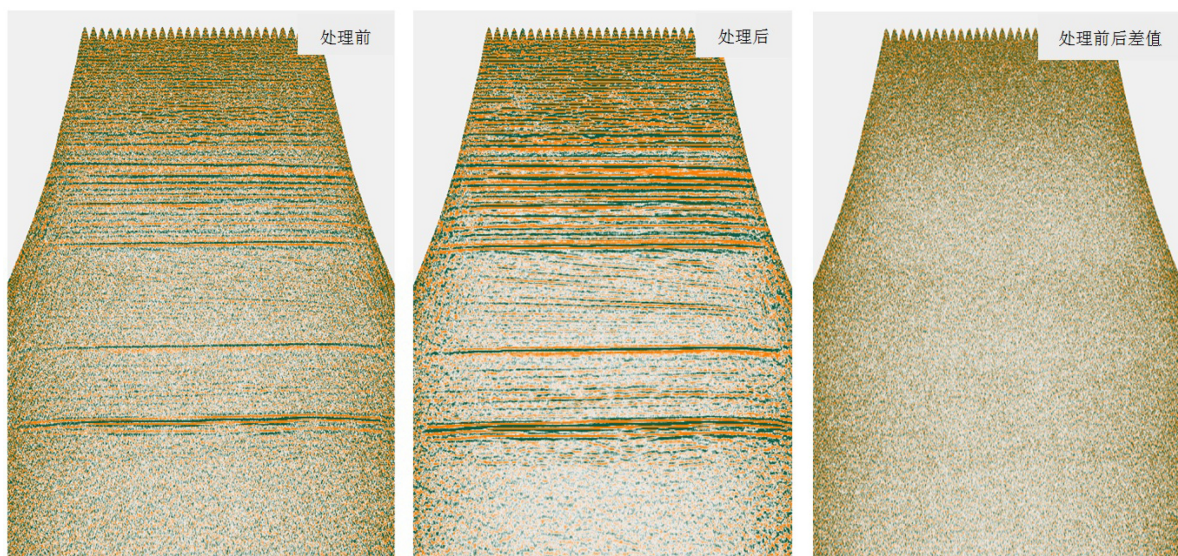


图 9 某工区应用本技术处理前、后及其残差数据的叠加剖面

Fig.9 Application of the technique to the stacked section of pre - and post-processing and residual data in a working area

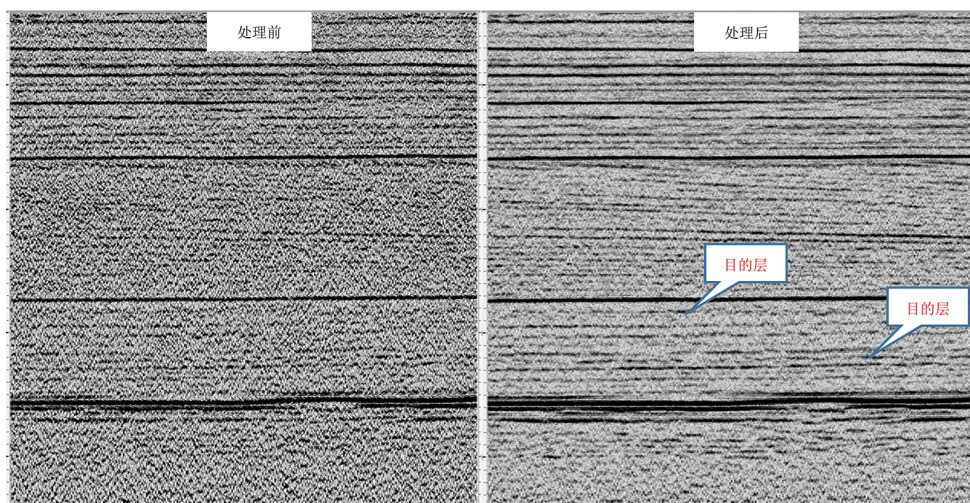


图 10 某工区应用本技术处理前、后的叠加剖面 (局部放大)

Fig.10 Stacked section before and after processing with this technique in a working area (local magnification)

步的研究。

(3) 矢量面元构建过程中, 允许偏移距和方位角与标准存在一定的误差, 其偏移距误差和方位角误差受处理参数控制, 误差参数越大, 矢量面元获得的道数则越多, 覆盖次数的增加有利于提高信噪比, 但不利于提高保真度。

(4) 经该技术处理可明显改善叠前炮集及道集资料品质, 可为速度分析、叠加及偏移成像等分析处理打下了良好的基础, 在低信噪比地震数据的精细成像中具有一定的优势和适应性。

#### 参考文献 (References)

[1] 蔡希玲, 张俊桥. 复杂地表区噪声分析技术与压噪方法应用[J]. 石

油地球物理勘探, 2002, 37(S1): 1-4. [CAI Xiling, ZHANG Junqiao. Noise analysis technology and application of noise suppression method in complex surface area [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(S1): 1-4.]

[2] 张希山, 张建英, 郑玉霞, 等. 复杂地区低信噪比地震资料处理方法研究[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(S1): 40-43. [ZHANG Xishan, ZHANG Jianying, ZHENG Yuxia, et al. Research on low-SNR seismic data processing methods in complex area [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(S1): 40-43.]

[3] XUE Y W, DONG S Q, SCHUSTER G T. Interferometric prediction and subtraction of surface waves with a nonlinear local filter [J]. Geophysics, 2009, 74(1): S11-S18.

[4] 高少武, 赵波, 周兴元. 自适应相干噪声衰减技术[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(3): 242-246. [GAO Shaowu, ZHAO Bo, ZHOU Xingyuan. Self-adaptive coherent noise attenuation technique [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(3): 242-246.]

- [5] 王兆湖, 王建民, 高振山, 等. 叠前自适应F-X域相干噪音衰减技术及应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(5): 2605-2610. [WANG Zhaohu, WANG Jianmin, GAO Zhenshan, et al. Pre-stack self-adapting F-X domain coherent noise attenuation technique and application [J]. *Progress in geophysics*, 2013, 28(5): 2605-2610.]
- [6] 刘俊, 吴淑玉, 施剑. 南黄海地震资料叠前去噪技术应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 165-173. [LIU Jun, WU Shuyu, SHI Jian. Application of pre-stack noise suppression technique in the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 165-173.]
- [7] 夏洪瑞, 葛川庆, 彭涛. 小波时空变阈值去噪方法在可控震源资料处理中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(1): 23-27. [XIA Hongrui, GE Chuanqing, PENG Tao. Application of wavelet time-space-varying threshold denoising method in vibroseis seismic data processing [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(1): 23-27.]
- [8] 刘洋, FOMEL S, 刘财, 等. 高阶Seislet变换及其在随机噪声消除中的应用[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(8): 2142-2151. [LIU Yang, FOMEL S, LIU Cai, et al. High-order Seislet transform and its application of random noise attenuation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(8): 2142-2151.]
- [9] 刘伟, 曹思远, 王征, 等. 基于贝叶斯阈值估计的曲波域自适应随机噪声衰减[J]. *石油物探*, 2013, 52(2): 115-120. [LIU Wei, CAO Siyuan, WANG Zheng, et al. The self-adaptive random noise attenuation in curvelet domain based on Bayes estimation [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2013, 52(2): 115-120.]
- [10] 赵翠霞, 王雨洁, 许卫华, 等. 胜利西部探区的几项适用处理技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S1): 36-42. [ZHAO Cuixia, WANG Yujie, XU Weihua, et al. Some distinctive processing techniques applied in Shengli Oilfield western exploration area [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S1): 36-42.]
- [11] 曹静杰, 杨志权, 杨勇, 等. 一种基于曲波变换的自适应地震随机噪声消除方法[J]. *石油物探*, 2018, 57(1): 72-78, 121. [CAO Jingjie, YANG Zhiquan, YANG Yong, et al. An adaptive seismic random noise elimination method based on Curvelet transform [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(1): 72-78, 121.]
- [12] 张力起, 张猛, 王华忠, 等. 高维地震数据Wiener中心滤波方法[J]. *石油物探*, 2019, 58(3): 325-334. [ZHANG Liqi, ZHANG Meng, WANG Huazhong, et al. Centralized Wiener filtering for high-dimensional seismic data [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(3): 325-334.]
- [13] 陈超群, 田媛媛, 高秦, 等. 基于随机函数数据重构的分频异常振幅衰减技术在巨厚黄土塬区的应用[J]. *石油物探*, 2019, 58(5): 741-749. [CHEN Chaoqun, TIAN Yuanyuan, GAO Qin, et al. Frequency-division abnormal amplitude attenuation after data reconstruction based on random function and its application in the very thick loess tableland area, Ordos Basin [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(5): 741-749.]
- [14] 许自强, 李添才, 万欢, 等. 三维深水崎岖海底区低信噪比地震资料处理策略[J]. *勘探地球物理进展*, 2010, 33(2): 99-106. [XU Ziqiang, LI Tiancai, WAN Huan, et al. Processing of low S/N 3-D seismic data from deep water bumpy sea bottom area [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2010, 33(2): 99-106.]
- [15] 王卫华. 利用中值相关滤波预测相干信号[J]. *石油地球物理勘探*, 2000, 35(3): 273-282. [WANG Weihua. Coherent signal prediction using mid-value correlative filtering [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2000, 35(3): 273-282.]
- [16] 夏洪瑞, 陈德刚, 周开明, 等. 中值约束下的矢量分解去噪[J]. *石油物探*, 2001, 40(3): 29-33. [XIA Hongrui, CHEN Degang, ZHOU Kaiming, et al. Noise elimination with median-constrained vector resolution [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2001, 40(3): 29-33.]
- [17] 李来林, 魏大力. LIFT去噪方法在地震资料处理中的应用[J]. *石油物探*, 2007, 46(2): 193-195. [LI Lailin, WEI Dali. Application of LIFT de-noise method in seismic data processing [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2007, 46(2): 193-195.]
- [18] 杨宁, 贺振华, 黄德济. 基于系数相关性阈值的波原子域叠前地震资料信噪分离方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(1): 53-57. [YANG Ning, HE Zhenhua, HUANG Deji. Signal and noise separation method for pre-stack seismic data in wave atomic domain based on coefficient correlation threshold [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011, 46(1): 53-57.]
- [19] 蒋立, 范旭, 刘宏杰, 等. 改进的矢量分解法压噪研究[C]//中国地球物理学会第二十八届年会. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2012: 387-388. [JIANG Li, FAN Xu, LIU Hongjie, et al. Study on improved vector resolution denoising method[C]//The Chinese Geophysics. Beijing: China University of science and Technology Press, 2012: 387-388.]
- [20] 聂爱兰, 智敏, 张宪旭, 等. 基于倾角中值滤波法的浅层反射地震叠前信噪分离技术[J]. *中国煤炭地质*, 2012, 24(2): 56-60. [NIE Ailan, ZHI Min, ZHANG Xianxu, et al. Shallow reflection seismic Prestack noise separation technology based on dip median filtering method [J]. *Coal Geology of China*, 2012, 24(2): 56-60.]
- [21] 袁恩辉, 陈风来, 齐志斌, 等. 奇异值分解在去除特殊干扰波中的研究与应用[J]. *非常规油气*, 2015, 2(5): 20-25. [YUAN Enhui, CHEN Fenglai, QI Zhibin, et al. Research and application of SVD in separation of special interference wave [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(5): 20-25.]
- [22] 徐云霞, 文鹏飞, 张宝金, 等. 琼东南海域OBS纵波资料成像处理关键技术[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(5): 185-192. [XU Yyunxia, WEN Pengfei, ZHANG Baojin, et al. The key technique of OBS p-wave imaging processing in Qiongdongnan area [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(5): 185-192.]